Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 1, Mar.-Apr. 2024, p. 51-67

The Impact of Agricultural Waste and Residue Composts on Two Consecutive Spinach Cultivations: 2- Response of Physiological Indicators, Growth, and Plant Nutrient Elements

Kh. Salarinik[1], M. Nael[2*], M. Sayyari[3], S.S. Moosavi[4]

1 and 2- Ph.D. Student of Soil Science and Assistant Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: m.nael@basu.ac.ir)
3- Associate Professor of Horticultural Sciences, Horticultural Sciences Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
4- Associate Professor of Agronomy and Plant Breeding, Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 05-08-2023 Revised: 16-12-2023 Accepted: 24-12-2023 Available Online: 24-12-2023	**How to cite this article:** Salarinik, Kh., Nael, M., Sayyari, M., & Moosavi, S.S. (2024). The impact of agricultural waste and residue composts on two consecutive spinach cultivations: 2- Response of physiological indicators, growth, and plant nutrient elements. *Journal of Water and Soil, 38*(1), 51-67. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83764.1319

Introduction

Application of agricultural waste composts, in addition to improving soil fertility, has positive effects on the quality of agricultural products and the environment by reducing the use of chemical fertilizers and recycling agricultural waste. Spinach (*Spinacea oleracea* L.) is a suitable plant for studying the effects of composts and chemical fertilizers due to some physiological characteristics such as high antioxidant activity and oxalic acid, significant amount of mineral compounds and vitamin C, and nitrate accumulation. Despite relatively extensive studies on the effect of different composts on plants, no study has been conducted so far to investigate the effect of grape pomace (GP) composts on plants in Iran. Therefore, the objectives of the present study were: 1- to investigate the effect of different GP composts on yield, nutrient elements, and some physiological parameters of spinach in comparison with two levels of urea fertilization in a pot experiment in two consecutive growing seasons, and 2- to investigate the relationship between nutrient elements and physiological indicators of spinach based on principal component analysis.

Materials and Methods

To investigate the effects of GP composts on yield, nutrient elements, and physiological parameters of spinach (Persius hybrid), an outdoor pot experiment was conducted in a randomized complete block design with eight compost treatments, two levels of urea fertilizer (46%), and a control treatment (C0) in three replications and two consecutive growing seasons (spring and fall). Compost treatments included: High grape pomace (HG) (60-63%) with chickpea straw and alfalfa (HG-Ch-A), high GP with chickpea straw and sugar beet pulp (HG-Ch-B), high GP with alfalfa and sugar beet pulp (HG-A-B), high GP combined with chickpea straw, alfalfa, and sugar beet pulp (HG-All); four other compost treatments included low level of grape pomace (LG) (37-42%) combined with other residues/wastes similar to the first four treatments (LG-Ch-A, LG-Ch-B, LG-A-B, and LG-All). Urea fertilizer treatments included: 150 kg per hectare (C150) (two-stage top dressing) and 500 kg per hectare (C500) (three-stage

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83764.1319

top dressing). Prior to planting, the composts were separately mixed into the soil (sandy loam) at a rate of 2% by weight). The first crop was grown for 50 days in May 2018 and the second crop was grown for 45 days in September 2018. In both seasons, plant samples were taken in the early morning at the end of the growing season to determine the fresh and oven-dried weight of shoot and root samples, leaf area, nutrient elements, and some physiological indicators. Some of the shoot samples were wrapped in aluminum foil and stored in a freezer (-20 °C) to determine the amount of chlorophyll (type a, type b, and total), carotenoids, total phenol, vitamin C, and antioxidant activity. Oxalic acid, zinc, iron, copper, sodium, potassium, phosphorus, calcium, magnesium, and nitrate were determined in oven-dried samples. One-way ANOVA was applied separately to spring and fall data, and mean comparisons were made using Duncan's test at the 0.05% level. Principal component analysis was used to determine the relationships between nutrient elements and physiological indicators of spinach.

Results and Discussion

The LG-Ch-A and C500 treatments (in spring cultivation), and the LG-A-B, LG-All, and HG-All treatments (in fall cultivation) had the highest leaf number, leaf area, and yield and were significantly difference from the C0 treatment. The high yield in C500, LG-Ch-A, LG-All, and HG-All treatments was associated with nitrate accumulation in spinach. In both cultivations, there was a significant positive correlation between the amount of P, K, Mg and Zn in spinach and the amount of these elements in the corresponding composts. A synergistic relationship was also observed between P and Mg; P and Zn; and Mg and Zn in spinach. On the other hand, an antagonistic relationship was observed between Ca and Mg in spinach because a high concentration of calcium inhibits magnesium uptake by reducing cell permeability. In both seasons, the chemical fertilizer treatments showed the highest amount of chlorophyll and carotenoids because these compounds increase with increasing nitrogen availability. On the contrary, the amount of antioxidant activity was significantly higher in compost treatments than in chemical treatments. In the spring cultivation, the highest and lowest amount of oxalic acid and oxalic acid/Ca ratio were observed in the LG-Ch-B and HG-All treatments, respectively. Interactions between nutrients and physiological indicators were observed. The uptake of all micronutrients, P, and Mg (in both cultivations) and K (in the fall cultivation) was inhibited by high Ca concentration. With the decrease of micronutrients uptake, an increase in nitrate accumulation may occur because micronutrients are present in the structure of nitrate reducing enzymes. The interdependence between Mg and oxalic acid/Ca (in spring), K and oxalic acid (in fall), and Na and oxalic acid/Ca (in fall) may be related to the role of oxalates in the uptake of mineral ions by plants, since oxalates are usually combined with Na, Mg, Ca, and K in the form of soluble and insoluble salts.

Conclusion

The use of urea chemical fertilizer (at two levels) and agricultural waste composts had different effects on the physiological indicators, growth and nutrients in spinach. Spinach grown in soils treated with composts rich in P, K, Mg, and Zn had higher nutritional value. The grouping of treatments by principal component analysis showed that chemical and control treatments were clearly separated from compost treatments with high amount of chlorophyll, carotenoid, nitrate, K, and Zn and low amount of oxalic acid, oxalic acid/Ca ratio, antioxidant activity, phenol, and Na. In general, the use of C500, LG-Ch-A, LG-All and HG-All treatments is not recommended due to nitrate accumulation in spinach.

Keywords: Grape pomace, Micronutrients, Nitrate accumulation, Oxalic acid

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۳، ص.۶۷-۵۱

تأثیر کمپوست برخی پسماندها و بقایای کشاورزی در دو کشت متوالی اسفناج: ۲- پاسخ شناسه‌های فیزیولوژیک، رشد و عناصر مغذی در گیاه

خدیجه سالاری نیک[۱]- محسن نائل[۲*]- محمد سیاری[۳]- سید سعید موسوی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

چکیده

استفاده از کمپوست پسماندهای کشاورزی علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک می‌تواند از طریق کاهش مصرف کودهای شیمیایی و بازچرخش پسماندها اثر مطلوبی بر کیفیت محصولات و محیط‌زیست داشته باشد. در این پژوهش اثر هشت کمپوست تهیه شده از تفاله انگور (G) (در دو سطح کم (LG) (۳۷ تا ۴۲ درصد) و زیاد (HG) (۶۰ تا ۶۳ درصد)) در ترکیب با یونجه (A)، تفاله چغندر (B) و کاه نخود (Ch)، بر رشد، عملکرد، شناسه‌های فیزیولوژیک و عناصر مغذی گیاه اسفناج در دو کشت متوالی (بهار و پاییز) مطالعه و نتایج آن با دو سطح کود شیمیایی اوره (C150 و C500) مقایسه شد. تیمارهای LG-Ch-A و C500 درکشت بهار و تیمارهای LG-A-B، LG-All (متشکل از تمام پسماندها)، و HG-All در کشت پاییز بیشترین تعداد برگ، شاخص سطح برگ و عملکرد را داشتند و اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نشان دادند. تیمار HG-Ch-A بیشترین مقدار K و Zn را در بین تیمارها داشت که همسو با مقدار بالای این عناصر در کمپوست‌های متناظرشان بود. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین مقدار P، K، Mg و Zn در اسفناج با مقدار این عناصر در کمپوست، در هر دو فصل کشت وجود داشت. همچنین رابطه‌ی هم‌افزایی بین عناصر P با Mg؛ P با Zn؛ و Mg با Zn در اسفناج مشاهده شد. در مقابل، رابطه‌ی هم‌آوردی بین دو عنصر Ca و Mg مشاهده شد، زیرا غلظت بالای کلسیم با کاهش نفوذپذیری سلول، جذب منیزیم را مهار می‌کند. در هر دو فصل کشت، بیشترین و کمترین مقدار کلروفیل و کاروتنوئید به‌ترتیب در تیمارهای C500 و LG-Ch-B مشاهده شد. در کشت بهار، بیشترین و کمترین مقدار اگزالیک اسید و نسبت oxalic acid/Ca به‌ترتیب در تیمار LG-Ch-B و HG-All مشاهده شد. به‌علاوه، مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی در تیمارهای کمپوست به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای شیمیایی بود. تیمار C500 در فصل بهار به‌طور معنی‌داری بیشترین مقدار تجمع نیترات را داشت. تیمار LG-All در هر دو فصل بیشترین مقدار تجمع نیترات را در بین تیمارهای کمپوست داشت. برهمکنش بین عناصر مغذی و شناسه‌های فیزیولوژیک اسفناج مشاهده شد. وابستگی متقابل بین مقدار Mg و oxalic acid/Ca (کشت بهار)، مقدار K و اگزالیک اسید، و مقدار Na و oxalic acid/Ca (کشت پاییز) می‌تواند به نقش اگزالات‌ها به‌عنوان یک جزء فعال متابولیک در جذب یون‌های معدنی توسط گیاهان مرتبط باشد. گروه‌بندی تیمارهای کود توسط تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که تیمارهای شیمیایی و شاهد به وضوح از تیمارهای کمپوست به‌دلیل مقدار زیاد کلروفیل،کاروتنوئید، نیترات، K و Zn؛ و مقدار کم اگزالیک اسید، نسبت oxalic acid/Ca، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل و Na جدا شدند. به‌طور کلی، استفاده از تیمارهای C500، LG-Ch-A، LG-All و HG-All به‌دلیل تجمع نیترات در اسفناج توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: اگزالیک اسید، تجمع نیترات، تفاله انگور، عناصر کم‌مصرف

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.nael@basu.ac.ir)
۳- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۴- دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83764.1319

مقدمه

استفاده از کمپوست‌های تهیه شده از پسماندهای کشاورزی به عنوان اصلاح کننده آلی خاک، سبب افزایش حاصلخیزی خاک، افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه، تولید پایدار محصولات کشاورزی (Boldrin *et al.*, 2009) و کاهش حجم پسماندهای کشاورزی رها شده در طبیعت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. از طرف دیگر استفاده از کمپوست‌ها سبب کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و به‌دنبال آن کاهش اثرات منفی کودهای شیمیایی بر سلامت محصولات کشاورزی و طبیعت می‌شود (Graham *et al.*, 2017). با این حال کمپوست‌ها دارای شوری بالا، پی‌اچ قلیایی تا خنثی و مقدار کم نیتروژن هستند (Machado *et al.*, 2020).

گیاه اسفناج (*Spinacea oleracea* L.) به‌دلیل برخورداری از برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک، گیاهی مناسب برای بررسی اثرات کمپوست‌ها و کودهای شیمیایی می‌باشد. این گیاه دارای دوره رشد کوتاه با بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در بین دیگر سبزیجات برگی (Gupta & Wagle, 1988) و حاوی مقدار قابل توجهی از ویتامین های C و E، بتاکاروتن، ترکیبات معدنی و فیبر می‌باشد (Lomnitski *et al.*, 2003). همچنین یکی از مهمترین ذخیره‌کنندگان نیترات نسبت به دیگر گیاهان می‌باشد (Maynard *et al.*, 1976). از دیگر ویژگی-های این گیاه وجود مقدار زیاد اگزالیک اسید می‌باشد که می‌تواند به صورت اگزالات کلسیم رسوب کرده و در مصرف‌کنندگان سبب سنگ کلیه شود.

از مطالعاتی که تاکنون به تأثیر کمپوست‌ها، کودهای آلی و شیمیایی بر مقدار عملکرد، ارزش غذایی و شناسه‌های فیزیولوژیک اسفناج پرداخته‌اند، نتایج متفاوتی بدست آمده است. برخی از محققان افزایش عملکرد اسفناج را در تیمارهای کمپوست نسبت به تیمارهای شیمیایی گزارش کرده‌اند (Machado *et al.*, 2020)، در حالی‌که برخی دیگر این افزایش را در تیمارهای شیمیایی (Machado *et al.*, 2021) یا در تیمارهای ترکیبی کمپوست و کود شیمیایی (Elia *et al.*, 1998) مشاهده کرده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد استفاده از کمپوست سبب افزایش سطح فسفر و پتاسیم گیاه اسفناج (Machado *et al.*, 2020; Machado *et al.*, 2021)، کاهش سطح عناصر کم‌مصرف (Anwar *et al.*, 2017) و بدون تأثیر معنی‌دار بر کلسیم، آهن و مس (Machado *et al.*, 2021) شده است. همچنین، استفاده از کمپوست ها و کودهای شیمیایی اثرات متفاوتی بر روی شناسه‌های فیزیولوژیک اسفناج داشته است. ماکادو و همکاران (Machado *et al.*, 2020; Machado *et al.*, 2021) مقدار بیشتر کلروفیل کل، کلروفیل a و فنل، و مقدار کمتر کلروفیل b، کاروتنوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی را در تیمارهای کمپوست نسبت به تیمار شیمیایی و ترکیب کمپوست با کود شیمیایی مشاهده کردند. خان و همکاران (Khan *et al.*, 2007) مقدار بیشتر نیترات، ویتامین C و گلوتامیک اسید، و مقدار کمتر اگزالیک اسید را در تیمارهای کمپوست نسبت به تیمار شاهد مشاهده کردند.

با وجود مطالعات نسبتا گسترده در زمینه تأثیر کمپوست‌های مختلف بر گیاه، تاکنون مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر کمپوست‌های تهیه شده از تفاله انگور بر روی گیاه در ایران انجام نشده است. بنابراین هدف از مطالعه‌ی حاضر بررسی تأثیر کمپوست‌های مختلف تولید شده از دو سطح تفاله انگور (زیاد و کم) در ترکیب با دیگر پسماندهای گیاهی (یونجه، تفاله چغندر و کاه نخود) بر عملکرد، عناصر مغذی و شناسه‌های فیزیولوژیک گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) و مقایسه آن با دو سطح کود شیمیایی اوره (میزان توصیه شده و میزان اعمال شده توسط کشاورزان) در یک آزمایش گلدانی در دو فصل کشت متوالی (بهار و پاییز) می‌باشد. همچنین بررسی روابط بین عناصر غذایی و شناسه‌های فیزیولوژیک گیاه اسفناج براساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد. لازم به ذکر است، کود اوره تنها کود شیمیایی مورد استفاده کشاورزان در کشت اسفناج در منطقه می‌باشد. به بیان دیگر، هدف این مطالعه ارزیابی مدیریت کودی مرسوم در کشت اسفناج در منطقه مطالعاتی، و مقایسه این مدیریت با یک مدیریت پایدارتر (استفاده از کمپوست پسماندها و بقایای کشاورزی) بود.

مواد و روش‌ها

تیمارها: به‌منظور بررسی تأثیر کمپوست‌های مختلف تولید شده از تفاله انگور بر عملکرد و کیفیت گیاه اسفناج و مقایسه‌ی آن با کود شیمیایی اوره، یک آزمایش گلدانی خارج گلخانه‌ای در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه بوعلی سینا طراحی و انجام شد. این آزمایش در چارچوب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با یک تیمار بدون کود (شاهد) (C0)، دو تیمار کود شیمیایی اوره ۴۶ درصد، شامل: تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره (C150) (اضافه‌شده در دو نوبت در طول دوره رشد) و تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (C500) (اضافه‌شده در سه نوبت در طول دوره رشد)، و هشت تیمار کمپوست در سه تکرار و در دو نوبت کشت متوالی (فصل بهار و فصل پاییز) انجام شد. تیمارهای کمپوست شامل: ۱) سطح بالای تفاله انگور (۶۳ درصد) همراه با کاه نخود و یونجه (HG-Ch-A)؛ ۲) سطح بالای تفاله انگور (۶۰ درصد) همراه با کاه نخود و تفاله چغندر (HG-Ch-B)؛ ۳) سطح بالای تفاله انگور (۶۰ درصد) همراه با یونجه و تفاله چغندر (HG-A-B)؛ ۴) سطح بالای تفاله انگور (۶۲ درصد) همراه با کاه نخود، یونجه و تفاله چغندر (HG-All)؛ و چهار تیمار دیگر کمپوست شامل سطح پایین تفاله انگور (۳۷ تا ۴۲ درصد) در ترکیب با سایر پسماندها/بقایا مشابه چهار تیمار اول (LG-Ch-A، LG-Ch-B، LG-A-B و LG-All) بود. برای این تحقیق از یک خاک

لومی شنی استفاده شد. ویژگی‌های خاک اولیه و کمپوست‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. روش تهیه‌ی کمپوست‌ها و شناسه‌های کیفیت و بلوغ کمپوست‌ها در مقاله شماره ۱ ارائه شده است (Salarinik & Nael, 2024).

کشت: برای کشت از بذر اسفناج رقم هیبرید پرسیوس (Spinach, Persius Hybrid) به‌دلیل طول دوره رشد کوتاه استفاده شد. به‌دلیل وجود عوامل بیماری‌زا و آفات گوناگون در گلخانه و نیز گرم بودن گلخانه‌ها و نبود تهویه‌ی مناسب در زمان کشت اسفناج، و با توجه به اینکه گرمای زیاد برای رشد اسفناج محدودیت ایجاد می‌کند، کشت در بیرون از گلخانه انجام شد. در اردیبهشت ۱۳۹۸ و قبل از کشت، تیمارهای کمپوست به مقدار ۲ درصد متناسب با وزن خاک هر گلدان (۷/۸ کیلوگرم) به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط شدند. سپس سطح هر گلدان به پنج قسمت تقسیم شد و در هر قسمت ۳ بذر در عمق ۱ سانتی‌متری کشت شد. بعد از جوانه‌زنی، ۵ بوته سالم در هر گلدان حفظ شد. آبیاری با آب شهری به‌صورت دوره‌ای برای حفظ رطوبت خاک در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شد. به‌طوری‌که در کشت اول به‌دلیل گرمای هوا نیاز به آبیاری هر روزه بود. پس از گذشت ۵۰ روز و اتمام فصل اول کشت (بهار) نمونه‌برداری از گیاه و خاک انجام شد. مجددا در شهریور ۱۳۹۸ به هر گلدان مقادیر مشابه کمپوست و کود شیمیایی به‌ترتیبی که در بالا ذکر شد، اضافه شد و نوبت دوم کشت (پاییز) به مدت ۴۵ روز اجرا شد. به‌دلیل تعدیل دما در فصل پاییز، آبیاری یک روز در میان انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های اولیه خاک و کمپوست‌های تهیه شده

Table 1- Characteristics of the initial soil and composts

شناسه‌ها Indicators	خاک اولیه Initial soil	کمپوست‌ها Composts							
		HG-Ch-A	LG-Ch-A	HG-Ch-B	LG-Ch-B	HG-A-B	LG-A-B	HG-All	LG-All
pH	8.26	8.4 b	8.1 d	8.6 a	8.4 b	8.0 de	8.3 c	8.1 d	8.0 e
نسبت کربن به نیتروژن C/N	9.17	12.7 bcd	12.6 bcd	14.2ab	15.4 a	13.3abc	11.3 cd	12.4 bcd	10.7 d
هدایت الکتریکی EC (μs cm^{-1})	250	833 b	1460 a	546 d	776 b	800 b	837 b	642 c	786 b
فسفر P (mg kg^{-1})	13.5	3627 a	3473 ab	3113 bc	3033 c	3083 c	2833 c	2713 d	2573 d
پتاسیم K (mg kg^{-1})	265.3	12567 a	12567 a	11767 a	10900 a	10677 a	12500 a	12367 a	11000 a
سدیم Na (mg kg^{-1})	155.6	2600 ab	2090 bc	2430abc	2700 a	2053c	2460abc	2427abc	2020c
کلسیم Ca (mg kg^{-1})	1282.6	2296 ab	2797 ab	1587 c	1280 c	2463 ab	2088 b	2714 ab	3090 a
منیزیم Mg (mg kg^{-1})	12.2	2609 a	760 b	2761 a	2533 a	963 b	1343 b	963 b	1241 b
آهن Fe (mg kg^{-1})	4.5	8104 cde	7687 de	10689 a	8886 bcd	7555 e	9565 ab	9322 bc	9839 ab
روی Zn (mg kg^{-1})	0.39	112 a	103 ab	115a	108 ab	97 b	106 ab	104 ab	105 ab
مس Cu (mg kg^{-1})	0.59	34.8 a	32.1 a	35.5 a	34.3 a	35.1 a	33.5 a	34.3 a	33.2 a
آمونیوم NH_4^+ (mg kg^{-1})	26.4	2.8 c	3.7 bc	3.4 bc	5.0 bc	38.7 a	4.5 bc	35.1 a	6.9 b
نیترات NO_3 (mg kg^{-1})	36.3	524 c	1291a	255 e	483 cd	362 de	491 cd	478 cd	787 b
کربن آلی کل OC (%)	0.64	15.6 ab	19.1 a	19.5 a	15.0 ab	16.0 ab	12.5 bc	14.2 bc	10.0 c
نیتروژن کل TN (%)	0.07	1.2 abc	1.5 a	1.4 ab	1.0c	1.2 abc	1.1 bc	1.1 bc	0.9 c

HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه. در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معناداری دارند ($p<0.05$).

HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: All three raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different ($p<0.05$).

پس از اتمام دوره رشد دوم، مجددا از گیاه و خاک نمونه‌برداری شد. تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر روی شاسه‌های حاصلخیزی خاک در مقاله دیگر ارائه شده است (Salarinik & Nael, 2024). در فصل اول کشت به‌دلیل گرمای زیاد و طولانی‌تر شدن دوره‌ی رشد، بیشتر بوته‌ها وارد فاز گلدهی شدند. در فصل دوم کشت به‌دلیل پیش‌بینی سازمان هواشناسی برای بارندگی شدید، کاهش محسوس دما و از بین رفتن محصولات کشاورزی، برداشت اسفناج زودتر از موعد انجام شد. از طرف دیگر به‌دلیل کاهش دما، حمله‌ی ملخ، آفت پروانه مینوز و گسترش شته سیاه، رشد گیاهان در فصل دوم کشت آسیب دید. برای کنترل ملخ از تور پارچه‌ای سفید با ارتفاع ۱ متر استفاده شد. برای کنترل آفت مینوز از کنترل فیزیکی به‌صورت جداسازی و معدوم کردن برگ‌های آلوده و همچنین استفاده از سم تریگارد به نسبت ۰/۴ در ۱۰۰۰ استفاده شد. برای کنترل و جلوگیری از گسترش شته سیاه از عصاره‌ی تنباکو (به نسبت ۱ به ۲۰ تنباکو به آب) استفاده شد.

نمونه‌برداری از گیاه: بعد از اتمام هر دوره رشد، نمونه‌برداری از گیاه در صبح زود انجام شد. نمونه‌ها درون پاکت کاغذی قرار گرفته و به‌منظور تعیین عملکرد، کیفیت و ارزش تغذیه‌ای سریعاً به آزمایشگاه منتقل شدند. برای حذف آلودگی‌های خاکی، سطح اسفناج‌ها با فرچه نرم تمیز شد. برگ‌ها برای تعیین شاخص سطح برگ توسط اسکنر اسکن شده، سپس مقدار این شاخص توسط نرم‌افزار Image J تعیین شد (Rasband, 2018). برای تعیین وزن تر، نمونه‌ها سریع وزن شدند. بخشی از نمونه‌های تازه پس از وزن شدن، درون فویل آلومینیومی قرار داده شد و برای تعیین برخی از شاسه‌های فیزیولوژیک درون فریزر نگهداری شد. بقیه نمونه‌ها برای تعیین عناصر غذایی و وزن خشک، درون آون در دمای ۷۰ درجه به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. به‌علاوه، وزن نمونه‌های فریزشده نیز در وزن کل آون خشک لحاظ شد. برای تعیین غلظت کل عناصر غذایی ۰/۵ گرم از نمونه‌های آون‌خشک توسط اسید نیتریک و هیدروژن پراکسید هضم شد (Huang & Schulte, 1985). غلظت روی، آهن و مس توسط دستگاه جذب اتمی (Varian Spectra AA 220 FS atomic absorption spectrophotometer)، و مقادیر سدیم و پتاسیم به روش فلیم فوتومتری (PFP7 film photometer, Janeway UK) تعیین شدند. مقدار فسفر به روش فسفومولیبدات–وانادات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتری تعیین شد (Estefan *et al*., 2013). برای اندازه گیری نیترات از روش سالیسیلیک اسید بهره‌گیری شد (Cataldo *et al*., 1975). به این صورت که به ۰/۲ میلی‌لیتر از عصاره گیاه، ۰/۸ میلی‌لیتر اسید سالیسیلیک ۵ درصد اضافه و پس از گذشت ۲۰ دقیقه، ۱۹ میلی‌لیتر سود ۲ نرمال اضافه شد تا pH به بالای ۱۲ برسد. سپس مقدار جذب در ۴۱۰ نانومتر قرائت شد. غلظت کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شدند (Cheng & Bray, 1951). مقادیر کلروفیل a، b و کل (Arnon, 1949)، کاروتنوئید (Lichtenthaler & Wellburn, 1983)، فنل کل (Singleton & Rossi, 1965)، ویتامین C (Sadasivam & Balasubramanian, 1987)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (Li *et al*., 2007) در نمونه برگ‌های فریز شده و مقدار اگزالیک اسید در نمونه‌های آون خشک (Naik *et al*., 2014) تعیین شد. علاوه بر اندام هوایی، نمونه‌برداری از ریشه به‌منظور تعیین طول ریشه و وزن تر و آون خشک انجام شد.

تحلیل‌های آماری: تجزیه واریانس داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS (SAS Institute Inc, 2013) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. مقایسات میانگین به روش دانکن در سطح ۰/۰۵ درصد و برای هر نوبت کشت به‌طور جداگانه انجام شد. به‌منظور بررسی روابط همبستگی بین داده‌های گیاهی، خاکی و کمپوست‌های بالغ از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. به‌علاوه، برای تعیین روابط متقابل بین مقدار عناصر مغذی در گیاه، و برای مشخص کردن رابطه عناصر غذایی گیاه با شاسه‌های فیزیولوژیکی، تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) توسط نرم‌افزار Minitab (Minitab Inc., 2013) بر روی داده‌ها (محتوای عناصرمغذی و شاسه‌های فیزیولوژیک) برای هر فصل کشت به‌طور جداگانه اعمال شد. به‌علاوه، تجزیه و تحلیل اخیر امکان گروه‌بندی رژیم‌های کودی (تیمارها) را فراهم کرد.

نتایج و بحث

شاسه‌های رشد و عملکرد اسفناج

در کشت اول (بهار)، تیمارهای LG-Ch-A، C500، و HG-Ch-B به‌ترتیب بهترین تیمارها، و تیمارهای LG-All، C150، C0، و HG-All به‌ترتیب ضعیف‌ترین تیمارها از نظر رشد و عملکرد بودند (جدول ۲). مقدار عملکرد در بین تیمارها تحت تأثیر فراهمی عناصر غذایی به ویژه نیتروژن قرار داشت (جدول ۱). تیمار C500 از نظر مقدار عملکرد وزن تازه (۷۴/۲ $g\ pot^{-1}$) اختلاف آماری معنی‌داری با تیمارهای C150، C0، و LG-All (به‌ترتیب ۴۴/۵، ۴۵/۱ و ۳۷/۵ $g\ pot^{-1}$) نشان داد (جدول ۲). همبستگی معنی‌دار مثبت بین شاخص سطح برگ با عملکرد؛ تعداد برگ با عملکرد؛ طول، وزن تر ریشه و وزن خشک ریشه با عملکرد مشاهده شد (جدول ۳).

در کشت دوم (پاییز)، تیمارهای LG-A-B، LG-All، و HG-All به‌ترتیب به‌عنوان بهترین تیمارها از نظر عملکرد (وزن تازه و آون خشک)، تعداد برگ، و شاخص سطح برگ بودند، و اختلاف معنی‌داری با تیمار C0 نشان دادند. با وجود مقدار کمتر نیتروژن در کمپوست‌های LG-A-B، LG-All، و HG-All، به‌دلیل pH کم کمپوست‌های مذکور (جدول ۱) و اثرات باقی‌مانده‌ی آن‌ها در خاک بعد از یک بار کشت (نظیر افزایش غلظت پتاسیم، منیزیم و عناصر کم‌مصرف در

تیمارهای LG-All و HG-All، و افزایش غلظت نیتروژن و پتاسیم در تیمار LG-A-B) (جدول ۴، مقاله‌ی ۱) (Salarinik & Nael, 2024)، مقدار عملکرد در این تیمارها بیشتر از دیگر تیمارها بود. تیمار LG-Ch-B به‌دلیل مقدار نیتروژن کم، pH بالا، و اثرات باقی‌مانده در خاک بعد از یک بار کشت (نظیر افزایش pH و کاهش فراهمی عناصر پتاسیم، منیزیم و عناصر کم‌مصرف)، به‌عنوان ضعیف‌ترین تیمار کمپوست شناخته شد. این تیمار کمترین وزن تازه اسفناج را در بین تیمارها داشت و اختلاف معنی‌داری با تیمار LG-A-B نشان داد (جدول ۲). مشابه با کشت بهار، همبستگی معنی‌دار مثبت بین شاخص‌های رشد و عملکرد مشاهده شد (جدول ۳). علی‌رغم عدم تفاوت معنی‌دار، مقدار عملکرد در تمام تیمارهای کمپوست و کود شیمیایی بیشتر از تیمار شاهد بود. افزایش عملکرد اسفناج با کاربرد کودهای آلی به‌دلیل افزایش عناصر غذایی خاک و افزایش فراهمی این عناصر برای گیاه (Boldrin *et al.*, 2009) و همچنین بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب، و افزایش فعالیت بیولوژیکی خاک گزارش شده است (Hargreaves *et al.*, 2008). ماکادو و همکاران (Machado *et al.*, 2020) بیان کردند که افزایش کمپوست به خاک به‌طور معنی‌داری مقدار رشد گیاه اسفناج را افزایش داد. میزان عملکرد و شاخص‌های رشد در تیمار شاهد (در هر دو فصل) و در تیمار C150 (در فصل بهار) بین ۰/۲۵ تا ۲/۵ برابر کمتر از تیمارهای کمپوست بود (جدول ۲).

در فصل پاییز، تیمار C500 شاخص‌های رشد و عملکرد کمتری نسبت به تیمار C150 داشت، هر چند این اختلاف معنی‌دار نبود (جدول ۲). استفاده از کودهای شیمیایی به‌تدریج سبب تخریب ساختمان خاک و غیر قابل فراهم شدن برخی عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاه می‌شوند (Ahmadi & Jafarpour, 2015).

جدول ۲- اثر هشت تیمار کمپوست تفاله انگور و دو سطح کود شیمیایی اوره بر شناسه‌های رشد و عملکرد اسفناج

Table 2- The effect of eight grape pomace composts and two levels of urea fertilizer on growth and yield parameters of spinach

تیمارها Treatments	تعداد برگ Leaf number	وزن تازه ساقه و برگ Shoot fresh weight	وزن خشک ساقه و برگ Shoot dry weight	وزن تازه ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	طول ریشه Root length	طول ساقه Petiole length	عرض برگ Leaf width	طول برگ Leaf length	سطح برگ Leaf area
		g pot^{-1}				cm				cm^2
بهار Spring										
C0	72^{ab}	45.1^{cd}	6.5^{bc}	4.1^{b}	1.1^{b}	12.1^{a}	4.1^{a}	2.8^{a}	4.6^{a}	13.5^{a}
C150	72^{ab}	44.5^{cd}	6.8^{bc}	3.9^{b}	1.0^{b}	10.5^{a}	4.3^{a}	2.7^{a}	4.7^{a}	13.2^{a}
C500	107^{a}	74.2^{ab}	10.0^{ab}	5.9^{ab}	1.6^{ab}	11.9^{a}	5.1^{a}	3.4^{a}	5.9^{a}	18.3^{a}
HG-Ch-A	89^{ab}	60.3^{bcd}	7.9^{abc}	6.6^{ab}	1.8^{ab}	10.4^{a}	5.5^{a}	3.1^{a}	6.8^{a}	18.2^{a}
HG-Ch-B	87^{ab}	68.7^{abc}	10.8^{ab}	6.5^{ab}	1.8^{ab}	12.9^{a}	3.9^{a}	2.7^{a}	5.1^{a}	13.6^{a}
HG-A-B	82^{ab}	53.4^{bcd}	7.7^{abc}	5.4^{ab}	1.5^{ab}	10.5^{a}	4.5^{a}	2.8^{a}	6.2^{a}	15.9^{a}
HG-All	88^{ab}	56.1^{bcd}	7.1^{bc}	4.5^{b}	1.2^{b}	11.3^{a}	4.3^{a}	2.9^{a}	5.9^{a}	15.5^{a}
LG-Ch-A	113^{a}	84.7^{a}	11.8^{a}	8.0^{a}	2.2^{a}	12.3^{a}	4.4^{a}	2.8^{a}	6.0^{a}	16.2^{a}
LG-Ch-B	76^{ab}	56.9^{bcd}	8.5^{abc}	5.3^{ab}	1.4^{ab}	13.0^{a}	4.5^{a}	3.1^{a}	6.3^{a}	16.7^{a}
LG-A-B	72^{ab}	66.2^{abc}	9.6^{abc}	6.7^{ab}	1.8^{ab}	11.6^{a}	4.6^{a}	3.2^{a}	6.3^{a}	18.2^{a}
LG-All	56^{b}	37.5^{d}	5.4^{c}	3.6^{b}	1.0^{b}	10.1^{a}	3.8^{a}	2.8^{a}	4.7^{a}	14.4^{a}
پاییز Fall										
C0	41^{b}	21.6^{c}	2.8^{b}	6.3^{b}	2.4^{ab}	18.7^{ab}	3.0^{a}	2.7^{b}	4.6^{a}	11.9^{b}
C150	47^{ab}	41.0^{abc}	5.2^{ab}	11.9^{ab}	3.4^{ab}	22.9^{ab}	3.9^{a}	3.5^{ab}	6.1^{a}	18.9^{ab}
C500	49^{ab}	40.6^{abc}	4.9^{ab}	8.2^{ab}	2.0^{b}	19.0^{ab}	3.3^{a}	3.4^{ab}	5.3^{a}	17.1^{ab}
HG-Ch-A	49^{ab}	43.9^{abc}	5.6^{ab}	18.2^{ab}	4.9^{ab}	26.9^{a}	3.2^{a}	3.6^{ab}	6.1^{a}	19.4^{ab}
HG-Ch-B	43^{ab}	29.0^{bc}	3.7^{ab}	11.0^{ab}	4.7^{ab}	19.2^{ab}	3.4^{a}	3.3^{ab}	5.2^{a}	15.9^{ab}
HG-A-B	40^{b}	29.3^{bc}	3.9^{ab}	9.7^{ab}	4.3^{ab}	18.5^{ab}	3.0^{a}	3.4^{ab}	4.8^{a}	16.3^{ab}
HG-All	52^{ab}	48.1^{ab}	6.3^{a}	19.5^{a}	8.0^{a}	25.2^{ab}	3.3^{a}	3.4^{ab}	6.2^{a}	19.2^{ab}
LG-Ch-A	47^{ab}	41.2^{abc}	5.4^{ab}	12.5^{ab}	4.1^{ab}	23.2^{ab}	3.2^{a}	3.6^{ab}	6.0^{a}	19.1^{ab}
LG-Ch-B	44^{ab}	26.4^{bc}	3.2^{ab}	7.2^{ab}	2.5^{ab}	15.0^{b}	2.8^{a}	3.0^{ab}	4.8^{a}	14.2^{ab}
LG-A-B	58^{a}	56.4^{a}	6.4^{a}	13.7^{ab}	3.8^{ab}	23.0^{ab}	3.4^{a}	3.8^{a}	6.5^{a}	22.3^{a}
LG-All	53^{ab}	49.8^{ab}	6.4^{a}	11.5^{ab}	3.3^{ab}	21.9^{ab}	3.8^{a}	3.8^{a}	6.3^{a}	20.7^{a}

C0: شاهد؛ C150: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره ؛ C500: ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره ؛ HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه؛ در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری دارند ($p<0.05$).

C0: Control; C150: 150 kg ha^{-1} of urea; C500: 500 kg ha^{-1} of urea; HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: Composed of all raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different ($p<0.05$).

جدول ۳- آزمون همبستگی پیرسون بین شاخص‌های رشد و عملکرد اسفناج

Table 3- Pearson's correlation test between growth and yield parameters of spinach

	تعداد برگ Leaf number	وزن تازه ساقه و برگ Shoot fresh weight	وزن خشک ساقه و برگ Shoot dry weight	وزن تازه ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	طول ریشه Root length	طول ساقه Petiole length	عرض برگ Leaf width	طول برگ Leaf length
بهار Spring									
وزن تازه ساقه و برگ Shoot fresh weight	.760**	1							
وزن خشک ساقه و برگ Shoot dry weight	.685**	.888**	1						
وزن تازه ریشه Root fresh weight	.520**	.801**	.867**	1					
وزن خشک ریشه Root dry weight	.520**	.801**	.867**	1.000**	1				
طول ریشه Root length	.252	.446**	.505**	.550**	.550**	1			
طول ساقه Petiole length	.404*	.482**	.342	.403*	.403*	.105	1		
عرض برگ Leaf width	.309	.508**	.491**	.525**	.525**	.328	.646**	1	
طول برگ Leaf length	.431*	.622**	.548**	.691**	.691**	.386*	.734**	.737**	1
سطح برگ Leaf area	.335	.617**	.488**	.592**	.592**	.232	.718**	.889**	.846**
پاییز Fall									
وزن تازه ساقه و برگ Shoot fresh weight	.825**	1							
وزن خشک ساقه و برگ Shoot dry weight	.810**	.956**	1						
وزن تازه ریشه Root fresh weight	.590**	.690**	.718**	1					
وزن خشک ریشه Root dry weight	.418*	.454**	.518**	.886**	1				
طول ریشه Root length	.530**	.568**	.625**	.723**	.577**	1			
طول ساقه Petiole length	.442**	.580**	.553**	.258	.079	.351*	1		
عرض برگ Leaf width	.551**	.826**	.838**	.580**	.340	.507**	.584**	1	
طول برگ Leaf length	.650**	.837**	.853**	.650**	.407*	.682**	.695**	.889**	1
سطح برگ Leaf area	.554**	.843**	.843**	.584**	.328	.481**	.625**	.973**	.924**

** و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطوح ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهند.

** and *indicate statistical significance at 1%and 5% levels, respectively.

کاهش قابل توجه شاخص‌های رشد و عملکرد با افزایش سطح کود شیمیایی از ۱۰۰ درصد به ۱۲۵ و ۱۵۰ درصد توسط گالی و همکاران (Ghaly *et al*., 2017) گزارش شده است.

عناصر غذایی در گیاه

در کشت بهار، اختلاف آماری معنی‌داری در محتوای پتاسیم و روی گیاه در بین تیمارها مشاهده نشد (جدول ۴). با این حال، تیمار HG-Ch-A بیشترین مقدار پتاسیم و روی را در بین تیمارها داشت (به‌ترتیب ۱۷۰۱/۷ و ۱/۲۲ mg/100gFW) که همسو با مقدار بالای این عناصر در کمپوست متناظرش می‌باشد (Salarinik & Nael, 2024). بیشترین مقدار سدیم و کمترین مقدار روی، فسفر و منیزیم در تیمار LG-All مشاهده شد (به‌ترتیب ۱۰۷/۱، ۰/۷۱، ۱۹/۹ و ۳۳/۷

(mg/100gFW). تیمار LG-Ch-B بیشترین مقدار منیزیم، آهن و مس، و کمترین مقدار کلسیم را داشت (به‌ترتیب ۱۴۰/۱، ۱۵/۸۹، ۱/۰۵ و ۸۴/۱ mg/100gFW). مقدار فسفر در تیمار HG-A-B به‌طور معنی داری بیشتر از تیمارهای شیمیایی، شاهد، LG-Ch-B، LG-A-B و LG-All بود. تیمار C150 مقدار سدیم، منیزیم، فسفر، آهن و مس بیشتر، و مقدار پتاسیم کمتری نسبت به تیمار C500 داشت که این تفاوت‌ها تنها برای مس معنی‌دار بود (جدول ۴). کمترین مقدار آهن و مس در تیمار HG-All مشاهده شد، و اختلاف معنی‌داری با تیمار C150 نشان داد.

در کشت پاییز، محتوای کلسیم، فسفر و مس گیاه اختلاف معنی داری بین تیمارها نشان نداد (جدول ۴). مقدار پتاسیم در همه‌ی تیمارهای کمپوست، به‌جز تیمارهای HG-All، LG-All و LG-A-B، به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار C500 بود. مقدار پتاسیم گیاه نه تنها تحت تأثیر فراهمی مقدار پتاسیم در خاک و پتاسیم کمپوست است، بلکه به‌دلیل وجود رابطه‌ی هم‌افزایی بین پتاسیم و نیتروژن، به فراهمی نیتروژن در خاک و نیتروژن کمپوست نیز بستگی دارد. به‌طوری‌که تیمارهای HG-All، LG-All و LG-A-B، با وجود فراهمی بالای پتاسیم خاک (جدول ۴، مقاله‌ی ۱) (Salarinik & Nael, 2024) و کمپوست متناظرشان (جدول ۱)، به‌دلیل نیتروژن کم در کمپوست متناظرشان (جدول ۱)، محتوای پتاسیم اسفناج کمتری داشتند. تیمار C500 نیز با وجود فراهمی نیتروژن بالا، به‌دلیل پتاسیم کم خاک، محتوای پتاسیم اسفناج کمتری داشت. کمترین مقدار پتاسیم و منیزیم در تیمار HG-All مشاهده شد. تیمار LG-Ch-A بیشترین مقدار پتاسیم و فسفر را در بین تمام تیمارها داشت، و منیزیم بیشتری نسبت به سایر تیمارهای کمپوست داشت. این همسو با فراهمی بیشتر نیتروژن، پتاسیم و فسفر، و مقدار کم نسبت کربن به ازت در کمپوست بود. مقدار روی در تیمار C0 (۰/۷۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای کمپوست، به‌جز تیمار HG-All، بود. تیمار LG-All به‌طور معنی‌داری آهن کمتری نسبت به تیمارهای C0، C500، HG-Ch-A و HG-All داشت.

جدول ٤- اثر هشت تیمار کمپوست تفاله انگور و دو سطح کود شیمیایی اوره بر مقدار عناصر غذایی اسفناج

Table 4- The effect of eight grape pomace composts and two levels of urea fertilizer on nutrient contents of spinach

تیمارها Treatments	پتاسیم K	سدیم Na	کلسیم Ca	منیزیم Mg	فسفر P	آهن Fe	روی Zn	مس Cu
	mg 100g^{-1} FW							
بهار **Spring**								
C0	1453.8^{a}	43.2^{b}	205.0^{a}	51.1^{bcd}	36.5^{bcde}	11.46^{ab}	1.16^{a}	0.48^{b}
C150	1425.9^{a}	51.2^{ab}	152.5^{ab}	54.3^{bcd}	36.7^{bcde}	16.95^{a}	1.13^{a}	1.15^{a}
C500	1529.3^{a}	25.6^{b}	164.4^{ab}	44.3^{cd}	23.9^{de}	11.47^{ab}	1.17^{a}	0.55^{b}
HG-Ch-A	1701.7^{a}	50.9^{ab}	152.4^{ab}	76.8^{bc}	52.8^{abc}	13.39^{ab}	1.22^{a}	0.74^{ab}
HG-Ch-B	1397.7^{a}	32.4^{b}	171.5^{a}	88.5^{b}	59.2^{ab}	13.67^{ab}	1.11^{a}	0.73^{ab}
HG-A-B	1321.5^{a}	41.0^{b}	173.6^{a}	71.8^{bcd}	65.1^{a}	13.16^{ab}	1.21^{a}	0.74^{ab}
HG-All	1359.7^{a}	37.9^{b}	177.5^{a}	42.4^{cd}	41.6^{abcde}	9.13^{b}	1.02^{a}	0.43^{b}
LG-Ch-A	1287.6^{a}	31.4^{b}	136.3^{ab}	88.4^{b}	46.3^{abcd}	12.00^{ab}	1.17^{a}	0.71^{ab}
LG-Ch-B	1346.7^{a}	35.0^{b}	84.1^{b}	140.1^{a}	33.6^{cde}	15.89^{ab}	0.73^{a}	1.05^{a}
LG-A-B	1513.9^{a}	48.0^{b}	171.3^{a}	77.5^{bc}	34.7^{bcde}	13.32^{ab}	0.79^{a}	0.71^{ab}
LG-All	1354.4^{a}	107.1^{a}	186.7^{a}	33.7^{d}	19.9^{e}	15.65^{ab}	0.71^{a}	0.94^{ab}
پاییز **Fall**								
C0	1003.3^{ab}	22.1^{ab}	46.8^{a}	112.9^{a}	32.3^{a}	6.35^{ab}	0.78^{a}	0.19^{a}
C150	967.1^{ab}	15.7^{ab}	47.9^{a}	112.2^{a}	28.7^{a}	5.00^{abc}	0.66^{ab}	0.21^{a}
C500	891.4^{bc}	10.3^{ab}	66.0^{a}	85.6^{ab}	32.8^{a}	7.42^{a}	0.67^{ab}	0.18^{a}
HG-Ch-A	1037.0^{a}	11.4^{ab}	68.6^{a}	85.0^{ab}	31.3^{a}	6.07^{ab}	0.61^{b}	0.17^{a}
HG-Ch-B	1017.0^{a}	19.1^{ab}	75.5^{a}	59.3^{b}	30.1^{a}	5.55^{abc}	0.54^{bc}	0.10^{a}
HG-A-B	1025.8^{a}	7.9^{b}	61.0^{a}	61.7^{b}	30.7^{a}	3.76^{bc}	0.45^{c}	0.11^{a}
HG-All	835.1^{c}	6.0^{b}	63.5^{a}	57.8^{b}	32.9^{a}	6.19^{ab}	0.64^{ab}	0.15^{a}
LG-Ch-A	1082.9^{a}	6.6^{b}	58.6^{a}	93.8^{ab}	35.7^{a}	4.38^{abc}	0.60^{bc}	0.10^{a}
LG-Ch-B	1031.2^{a}	24.0^{a}	63.0^{a}	70.3^{ab}	33.4^{a}	4.73^{abc}	0.57^{bc}	0.09^{a}
LG-A-B	961.2^{abc}	16.6^{ab}	73.4^{a}	72.0^{ab}	31.3^{a}	5.34^{abc}	0.51^{bc}	0.12^{a}
LG-All	964.6^{ab}	14.7^{ab}	58.3^{a}	80.0^{ab}	32.2^{a}	2.28^{c}	0.57^{bc}	0.15^{a}

C0: شاهد؛ C150: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره ؛ C500: ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره ؛ HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه؛ در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری دارند ($p<0.05$).

C0: Control; C150: 150 kg ha^{-1} of urea; C500: 500 kg ha^{-1} of urea; HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: Composed of all raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different ($p<0.05$).

این می‌تواند تحت تأثیر مقدار کم آهن خاک بعد از یکبار کشت در این تیمار باشد (جدول ۴، مقاله‌ی ۱) (Salarinik & Nael, 2024). مقدار منیزیم در تیمارهای C0 و C150 بیشتر از همه‌ی تیمارها بود، و اختلاف معنی‌داری با تیمارهای HG-All، HG-A-B و HG-Ch-B نشان داد (جدول ۴).

مقدار فسفر گیاه در کشت بهار در بیشتر تیمارهای کمپوست، نسبت به تیمارهای شاهد و شیمیایی، به‌ویژه تیمار C500، روند افزایشی نشان داد. همبستگی مثبتی بین مقدار فسفر گیاه و مقدار فسفر کمپوست مشاهده شد (r=۰/۴۵). این مشاهده همسو با نتایج دیگر محققان است (Hargreaves *et al.*, 2008). ماده آلی منبع فسفر است و بنابراین می‌تواند جذب فسفر توسط گیاهان را با تشکیل کمپلکس‌های فسفات آلی، افزایش دسترسی فسفر (Yang *et al.*, 2013) و افزایش ریشه های جانبی افزایش دهد.

غلظت عناصر در گیاه تحت تأثیر غلظت عناصر در خاک و کود به کار رفته است، به گونه‌ای که انتظار می‌رود با افزایش غلظت عناصر در خاک و یا استفاده از کود، غلظت آن‌ها در گیاه افزایش یابد (Mengel & Kirkby, 2001). بر اساس تحلیل همبستگی، در هر دو فصل کشت، رابطه‌ی مثبتی بین مقدار P، K، Mg و Zn در اسفناج با مقدار این عناصر در کمپوست وجود داشت (نتایج در قالب جدول ارائه نشده است). همبستگی مثبتی بین مقدار P اسفناج با مقدار Mg کمپوست و بالعکس (بین Mg اسفناج با P کمپوست)، و بین Zn اسفناج با Mg و P کمپوست و بالعکس (بین Mg و P اسفناج با Zn کمپوست)، و رابطه ی مثبتی بین مقدار عملکرد با مقدار این عناصر در کمپوست و مقدار این عناصر در اسفناج مشاهده شد. این امر می‌تواند نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه‌ی هم‌افزایی بین این عناصر باشد. همچنین همبستگی منفی بین مقدار Ca و Mg در اسفناج، Ca کمپوست با Mg اسفناج، و همچنین Ca اسفناج و Ca کمپوست با عملکرد مشاهده شد که می‌تواند نشان از رابطه‌ی هم‌آوردی دو عنصر کلسیم و منیزیم باشد. چنین رابطه‌ای بین مقدار Ca کمپوست با P و Zn اسفناج و عملکرد مشاهده شد. در فصل پاییز، بین مقدار Zn خاک (بعد از کشت اول) با Zn و Fe گیاه همبستگی منفی مشاهده شد (نتایج در قالب جدول ارائه نشده است). علت عدم همبستگی و یا همبستگی منفی بین غلظت عناصر در گیاه و خاک می‌تواند به دلیل سن گیاه، قابلیت دسترسی عناصر دیگر به دلیل روابط هم‌آوردی و هم‌افزایی بین عناصر (Mengel & Kirkby, 2001) و شرایط محیطی نظیر pH و دما باشد.

شناسه‌های فیزیولوژیک اسفناج

مقدار کلروفیل‌ها (نوع a، b و کل) و کاروتنوئید در هر دو فصل کشت، و ویتامین C در کشت بهار، در تیمارهای کود شیمیایی بیشتر از تیمارهای کمپوست و شاهد بود (جدول ۵). در مقابل، مقدار فعالیت آنتی اکسیدانی و اگزالیک اسید در هر دو فصل کشت نتیجه عکس نشان داد، به‌طوری‌که در تیمارهای کود شیمیایی کمتر از تیمارهای کمپوست و شاهد بود. تیمارهای LG-Ch-B و LG-A-B کمترین مقدار کلروفیل‌ها و کاروتنوئید را در بین تیمارها داشتند، و اختلاف معنی‌داری با تیمارهای C500 و HG-Ch-A نشان دادند. لازم به ذکر است که کمپوست‌های LG-Ch-B و LG-A-B دارای مقدار نیتروژن کم بودند (جدول ۱). نیتروژن در ساختار کلروفیل‌ها حضور دارد که با افزایش فراهمی آن مقدار کلروفیل‌ها افزایش می‌یابد (Wang *et al.*, 2021). تیمار C500 در هر دو فصل کشت بیشترین مقدار کلروفیل کل (به ترتیب ۹۵/۳ و ۱۹۴/۴ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) و کاروتنوئید (۳۰/۴ و ۶۸/۷ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه)، و در کشت بهار بیشترین مقدار نیترات (۴۶/۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) و کمترین مقدار فنل (۱۱۱/۹ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) و فعالیت آنتی اکسیدانی (۱۹/۰ درصد) را در بین تیمارها داشت. مقدار نیترات در تیمار LG-All در کشت بهار (۳۲/۱ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای LG-Ch-B، HG-Ch-B، HG-Ch-A، HG-All و C150 بود. این همسو با مقادیر نیترات در کمپوست‌های متناظرشان بود (جدول ۱). کمترین مقدار نیترات در کشت بهار، در تیمار HG-Ch-A (۱۲/۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه)، و در کشت پاییز در تیمار LG-Ch-B (۱۹/۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) مشاهده شد. تیمار LG-All به‌دلیل pH پایین و نسبت پایین کربن به ازت از یک طرف، و غلظت بالای نیترات در کمپوست متناظرش (جدول ۱)، در هر دو فصل بیشترین مقدار تجمع نیترات را در بین تیمارهای کمپوست داشت (جدول ۵). در کشت بهار، تیمارهای HG-Ch-B و LG-Ch-B بیشترین مقدار اگزالیک اسید را در بین تیمارها داشتند که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای شیمیایی و HG-All نشان داد. بیشترین مقدار نسبت اگزالیک اسید به کلسیم در تیمار LG-Ch-B مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با همه‌ی تیمارها نشان داد. کمترین مقدار این شاخص در تیمارهای شاهد، شیمیایی و HG-All مشاهده شد.

ماکادو و همکاران (Machado *et al.*, 2020) بیان کردند که میزان کلروفیل کل، کلروفیل a و نسبت کلروفیل a:b در تیمار کمپوست بیشتر از تیمارهای ترکیبی کمپوست با کود شیمیایی بود و نتیجه عکس را برای مقدار کلروفیل b و کاروتنوئید گزارش کردند. افزایش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید در اسفناج با افزایش فراهمی نیتروژن توسط محققان دیگر گزارش شده است (Machado *et al.*, 2020).

جدول ۵-اثر هشت تیمار کمپوست تفاله انگور و دو سطح کود شیمیایی اوره بر ویژگی‌های فیزیولوژیک اسفناج

Table 5- The effect of eight grape pomace composts and two levels of urea fertilizer on physiology parameters of spinach

تیمارها Treatments	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Chlorophyll T	کاروتنوئید Carotenoid	اگزالیک اسید Oxalic acid	ویتامین C Vitamin C	نیترات Nitrate	فنل کل Total phenol	فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity	نسبت اگزالیک اسید به کلسیم Oxalic acid/Ca
	mg 100g^{-1} FW							mg GAE 100g^{-1} FW	%	
بهار Spring										
C0	44.4^{bc}	14.8^{bc}	59.2^{bc}	18.9^{bc}	2582.7^{abcd}	14.2^{a}	19.5^{bc}	160.6^{a}	36.6^{ab}	12.7^{c}
C150	55.3^{abc}	18.1^{abc}	73.4^{abc}	24.2^{abc}	2184.4^{d}	14.2^{a}	15.8^{c}	130.1^{a}	25.2^{bc}	14.4^{bc}
C500	71.0^{a}	24.3^{a}	95.3^{a}	30.4^{a}	2319.7^{bcd}	14.5^{a}	46.6^{a}	111.9^{a}	19.0^{c}	14.1^{c}
HG-Ch-A	63.2^{ab}	20.1^{ab}	83.3^{ab}	27.1^{ab}	2612.7^{abcd}	13.5^{b}	12.6^{c}	132.7^{a}	42.2^{a}	19.4^{bc}
HG-Ch-B	37.6^{c}	13.3^{bc}	50.9^{bc}	17.4^{bc}	2956.4^{a}	13.4^{b}	17.4^{c}	162.0^{a}	49.8^{a}	17.8^{bc}
HG-A-B	49.9^{abc}	15.6^{abc}	65.4^{abc}	22.2^{abc}	2756.8^{abcd}	13.6^{ab}	19.5^{bc}	140.9^{a}	44.0^{a}	17.3^{bc}
HG-All	52.5^{abc}	17.0^{abc}	69.6^{abc}	22.5^{abc}	2288.1^{cd}	13.8^{ab}	13.7^{c}	117.9^{a}	37.9^{ab}	13.3^{c}
LG-Ch-A	41.1^{bc}	13.0^{bc}	54.1^{bc}	18.1^{bc}	2736.3^{abcd}	13.8^{ab}	20.3^{bc}	110.4^{a}	42.1^{a}	22.6^{b}
LG-Ch-B	33.0^{c}	10.0^{c}	44.1^{c}	15.6^{c}	2932.7^{a}	13.3^{b}	17.5^{c}	145.3^{a}	46.7^{a}	35.5^{a}
LG-A-B	34.8^{c}	11.4^{c}	46.2^{c}	16.2^{c}	2829.5^{abc}	13.7^{ab}	22.2^{bc}	135.0^{a}	43.0^{a}	17.7^{bc}
LG-All	40.1^{bc}	13.1^{bc}	53.2^{bc}	17.6^{bc}	2895.6^{ab}	13.3^{b}	32.1^{b}	160.5^{a}	46.6^{a}	15.5^{bc}
پاییز Fall										
C0	109.9^{bc}	32.6^{bc}	142.5^{bc}	52.3^{bc}	1304.1^{a}	29.7^{b}	28.1^{a}	131.1^{a}	9.0^{b}	28.8^{a}
C150	132.9^{ab}	40.7^{ab}	173.6^{ab}	62.6^{ab}	931.9^{a}	30.4^{b}	27.3^{a}	90.9^{ab}	8.9^{b}	19.6^{a}
C500	148.9^{a}	45.6^{a}	194.4^{a}	68.7^{a}	1020.9^{a}	28.1^{b}	20.6^{a}	90.3^{ab}	9.1^{b}	15.9^{a}
HG-Ch-A	119.4^{abc}	37.4^{abc}	156.8^{abc}	56.9^{abc}	1103.6^{a}	42.9^{a}	20.7^{a}	89.3^{ab}	23.1^{a}	18.3^{a}
HG-Ch-B	103.3^{bc}	29.6^{bc}	132.9^{bc}	48.4^{bc}	1061.4^{a}	30.3^{b}	31.8^{a}	87.7^{ab}	28.7^{a}	15.6^{a}
HG-A-B	91.2^{c}	26.9^{c}	118.1^{c}	44.9^{c}	1094.6^{a}	35.2^{ab}	20.8^{a}	90.0^{ab}	28.4^{a}	19.7^{a}
HG-All	100.3^{bc}	29.1^{bc}	129.4^{bc}	48.7^{bc}	1229.3^{a}	35.4^{ab}	37.0^{a}	85.2^{ab}	26.5^{a}	23.4^{a}
LG-Ch-A	102.9^{bc}	29.9^{bc}	132.8^{bc}	48.8^{bc}	1001.5^{a}	33.0^{ab}	36.3^{a}	87.1^{ab}	30.9^{a}	30.1^{a}
LG-Ch-B	89.5^{c}	25.2^{c}	114.7^{c}	44.6^{c}	1192.2^{a}	28.4^{b}	19.0^{a}	93.9^{ab}	33.1^{a}	19.5^{a}
LG-A-B	131.5^{ab}	40.2^{ab}	171.7^{ab}	61.0^{ab}	1077.8^{a}	27.4^{b}	25.4^{a}	61.5^{b}	22.3^{a}	15.6^{a}
LG-All	116.4^{abc}	36.3^{abc}	152.6^{abc}	54.8^{abc}	1018.1^{a}	32.1^{ab}	37.3^{a}	89.7^{ab}	30.7^{a}	28.9^{a}

C0: شاهد؛ C150: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره ؛ C500: ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره ؛ HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه؛ در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری دارند ($p<0.05$).

C0: Control; C150: 150 kg ha^{-1} of urea; C500: 500 kg ha^{-1} of urea; HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: Composed of all raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different ($p<0.05$).

نسبت کلروفیل a:b در تمام تیمارها در فصل بهار بین ۲/۹ تا ۳/۲ و در فصل پاییز بین ۳/۲ تا ۳/۶ بود که مشابه مقدار گزارش شده توسط ماکادو و همکاران (Machado *et al*., 2020) (۲/۹-۴/۳)، و زو و مو (Xu & Mou, 2016) (۳/۲-۴/۱) است. مقدار کلروفیل در فصل پاییز در تیمارهای کمپوست همبستگی مثبت با مقدار عملکرد (۰/۵۱۴)، شاخص سطح برگ (۰/۴۹۶) و تعداد برگ (۰/۴۴۵) داشت. محققان دیگر نیز ارتباط مثبتی بین مقدار کلروفیل با شاخص سطح برگ، تعداد برگ و عملکرد بیان کرده‌اند، چرا که با افزایش مقدار فتوسنتز مقدار کلروفیل نیز افزایش می‌یابد (Alessa *et al*., 2017; Wang *et al*., 2008).

تعیین مقدار اگزالات در اسفناج به‌عنوان یک سبزی برگی پرمصرف که قابلیت بالایی در تجمع این ترکیب دارد مهم است، زیرا اگزالیک اسید به‌عنوان یک ماده ضد مغذی برای انسان مطرح است و باعث رسوب کلسیم، منیزیم و آهن و ایجاد سنگ کلیه می‌شود. مقدار اگزالیک اسید در هر دو فصل کشت، در تیمار C500 بیشتر از تیمار C150 بود که این نتیجه همسو با یافته گالی و همکاران (Ghaly *et al*., 2017) است. آن‌ها بیان کردند با افزایش سطح کود شیمیایی از ۵۰ تا ۱۰۰٪، مقدار اگزالیک در هر دو فصل کشت در اسفناج افزایش یافت. از طرف دیگر، مقدار اگزالیک اسید در هر دو فصل، در تیمارهای کمپوست بیشتر از تیمارهای شاهد و شیمیایی بود، هر چند این تفاوت‌ها در موارد محدودی معنی‌دار بود (جدول ۵). آلسا و همکاران (Alessa *et al*., 2017) اختلاف معنی‌داری برای مقدار اگزالیک اسید بین تیمارهای کود شیمیایی با تیمار کود آلی (هوماکس) مشاهده نکردند. محققان بیان کردند که تأثیر کودها بر مقدار اگزالیک اسید بستگی به گونه گیاه،

شرایط محیطی و مقدار و زمان کاربرد کود دارد (Kunicki *et al.*, 2010).

نسبت اگزالیک اسید به کلسیم یک شاخص کیفی مهم است و هر چه این نسبت در گیاه کمتر باشد خطر رسوب کلسیم به‌صورت اگزالات کلسیم کاهش می‌یابد (Erfani *et al.*, 2006). مقدار این نسبت در فصل بهار، در همه‌ی تیمارهای کمپوست، به جز تیمار HG-All، و در فصل پاییز، در تیمارهای HG-All، LG-All و LG-Ch-A نسبت به تیمارهای شیمیایی روند افزایشی نشان داد، هر چند این افزایش در فصل پاییز معنی‌دار نبود (جدول ۵). نقش اصلی اگزالات در اسفناج خنثی کردن OH^- آزاد شده در طی احیای نیترات است (Tanaka *et al.*, 2001). کود نیترات آمونیوم به سرعت در آب حل می‌شود و بنابراین برای گیاهان با چرخه زندگی کوتاه (مانند اسفناج) مناسب است، با این‌حال تجمع اگزالات را تحریک می‌کند (Stagnari *et al.*, 2007).

اغلب سبزیجات دارای آنتی‌اکسیدان‌هایی به شکل ترکیبات فنلی مانند اسید اسکوربیک، توکوفرول‌ها، کاروتنوئیدها، فلاونول‌ها و اسیدهای فنولیک هستند (Deveci & Uzun, 2011). مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی در تیمارها در کشت اول بین ۱۹/۰ تا ۴۹/۸ درصد و در کشت دوم بین ۸/۹ تا ۳۳/۱ درصد بود. تیمارهای کمپوست در هر دو فصل کشت دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بیشتری نسبت به تیمارهای کود شیمیایی و شاهد بودند؛ این تفاوت در فصل دوم کشت بارزتر بود (جدول ۵). ماکادو و همکاران (Machado *et al.*, 2021) بیان کردند که مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی در اسفناج کشت شده در خاک‌های خنثی و اسیدی تیمار شده با کمپوست پسماندهای جامد شهری کمتر از تیمار شاهد و تیمارهای ترکیبی کمپوست و کود شیمیایی بود. اسفناج در بین سبزیجات دارای بالاترین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی است (Gupta & Wagle, 1988). محتوای آنتی‌اکسیدانی بالا بر کاهش سرعت پیری گیاه مؤثر است (Hodges & Forney, 2003).

مقدار فنل در کشت بهار یک روند افزایشی را در تیمارهای شاهد و کمپوست، به‌جز تیمارهای HG-All و LG-Ch-A، نسبت به تیمارهای شیمیایی نشان داد، هر چند در هیچ مورد این تفاوت‌ها معنی دار نبود (جدول ۵). این روند در کشت دوم مشاهده نشد، هرچند بیشترین مقدار فنل، مانند فصل اول، در تیمار شاهد مشاهده شد (به ترتیب ۱۳۱/۱ و ۱۶۰/۶ $mg\ 100g^{-1}fw$). همبستگی مثبت معنی‌دار بین فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای فنل کل توسط یوسفی و همکاران (Yosefi *et al.*, 2010) گزارش شده است. این محققان بیان کرده‌اند که حضور ترکیبات فنلی سبب افزایش معنی‌دار فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Yosefi *et al.*, 2010). ماکادو و همکاران (Machado *et al.*, 2020) بیان کردند که با کاربرد کودهای نیتروژن (آمونیوم سولفات و آمونیوم نیترات) مقدار فنل کل به‌طور معنی‌داری (۳۳٪) نسبت به تیمار کمپوست کاهش یافت. مقدار فنل کل در تیمار C500 کمتر از تیمار C150 بود و در تیمار C0 بیشترین مقدار بود (جدول ۵). محققان بیان کرده‌اند که با کاهش نیتروژن، ساخت زیستی فنل کل افزایش می‌یابد (Xu & Mou, 2016).

مقدار ویتامین C در فصل بهار، در تیمارهای شیمیایی و شاهد به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار HG-Ch-A بود. نتیجه عکس برای کشت پاییز مشاهده شد، به‌طوری‌که این ترکیب در تیمار HG-Ch-A بیشتر از تیمارهای شیمیایی و شاهد بود.

در سبزیجاتی نظیر اسفناج به‌دلیل عدم تعادل بین مقدار جذب و احیاء نیترات، مقدار نیترات افزایش می‌یابد (Wang *et al.*, 2008)، زیرا گیاه اسفناج یک سیستم کارا برای جذب نیترات و یک سیستم غیر کارا برای احیاء نیترات به نیتریت دارد (Maynard *et al.*, 1976). مقدار نیترات در همه‌ی تیمارها، در هر دو فصل کشت، کمتر از حد مجاز این شاخص بود (mg/kg.fw ۳۰۰۰–۲۰۰۰). مقدار نیترات در تیمار C500 (mg/kg.fw ۴۶۶) در فصل بهار حدود ۴۵ تا ۲۷۲ درصد بیشتر از تیمارهای کمپوست بود. این امر به‌دلیل فراهمی بالای نیتروژن در کودهای شیمیایی نسبت به سرعت رهاسازی آهسته در کمپوست‌ها می‌باشد. سیتاک و سونمز (Citak & Sonmez, 2010) مقدار نیترات بیشتری را در اسفناج‌های کشت شده در تیمار کود شیمیایی (۴۷۷ mg/kg.fw) نسبت به تیمارهای کود آلی (حداکثر mg/kg.fw ۷۶) مشاهده کردند. در بین تیمارهای کمپوست، تیمار LG-All مقدار نیترات بیشتر، و تیمار HG-Ch-A مقدار نیترات کمتری را در هر دو فصل کشت داشتند. این امر می‌تواند به‌دلیل غلظت کم عنصر آهن و روی در این تیمار باشد. محققان یکی از عوامل تجمع نیترات در گیاه را وضعیت عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن دانسته‌اند، زیرا آهن در ساختار آنزیم‌های کاهنده نیترات حضور دارد (Ghaly *et al.*, 2017).

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

روابط متقابل بین عناصر مغذی جذب شده توسط اسفناج، همچنین روابط این عناصر با شاخص‌های فیزیولوژیک برای هر فصل کشت توسط روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی بررسی شد (شکل ۱ a و ۱ b). برای هر دو فصل کشت، دو مؤلفه اول بیش از ۵۸ درصد تغییرپذیری را توضیح دادند (شکل ۱ a و ۱ b). در کشت اول، جذب Fe و Cu به شدت به یکدیگر وابسته بودند (ضریب همبستگی r= ۰/۹۹). این نشان می‌دهد که افزایش جذب یکی منجر به افزایش جذب دیگری توسط اسفناج می‌شود. همین وابستگی متقابل برای مقادیر تجمع یافته NO_3^- و Ca وجود داشت. وابستگی متقابل کمی ضعیف‌تر برای جذب P و Mg؛ NO_3^- و K؛ K و Zn؛ Cu و Na؛ و Fe و Na مشاهده شد (شکل ۱ a). در کشت دوم، وابستگی متقابل بالایی بین جذب Mg و Zn، و وابستگی متقابل کمی ضعیف‌تر برای جذب Mg و Cu؛ Fe و Zn؛ Fe و Cu؛ P و K؛ NO_3^- و Ca مشاهده شد (شکل b۱). هماهنگ با برهمکنش مثبت مشاهده شده بین پتاسیم و روی، شوکلا و موخی

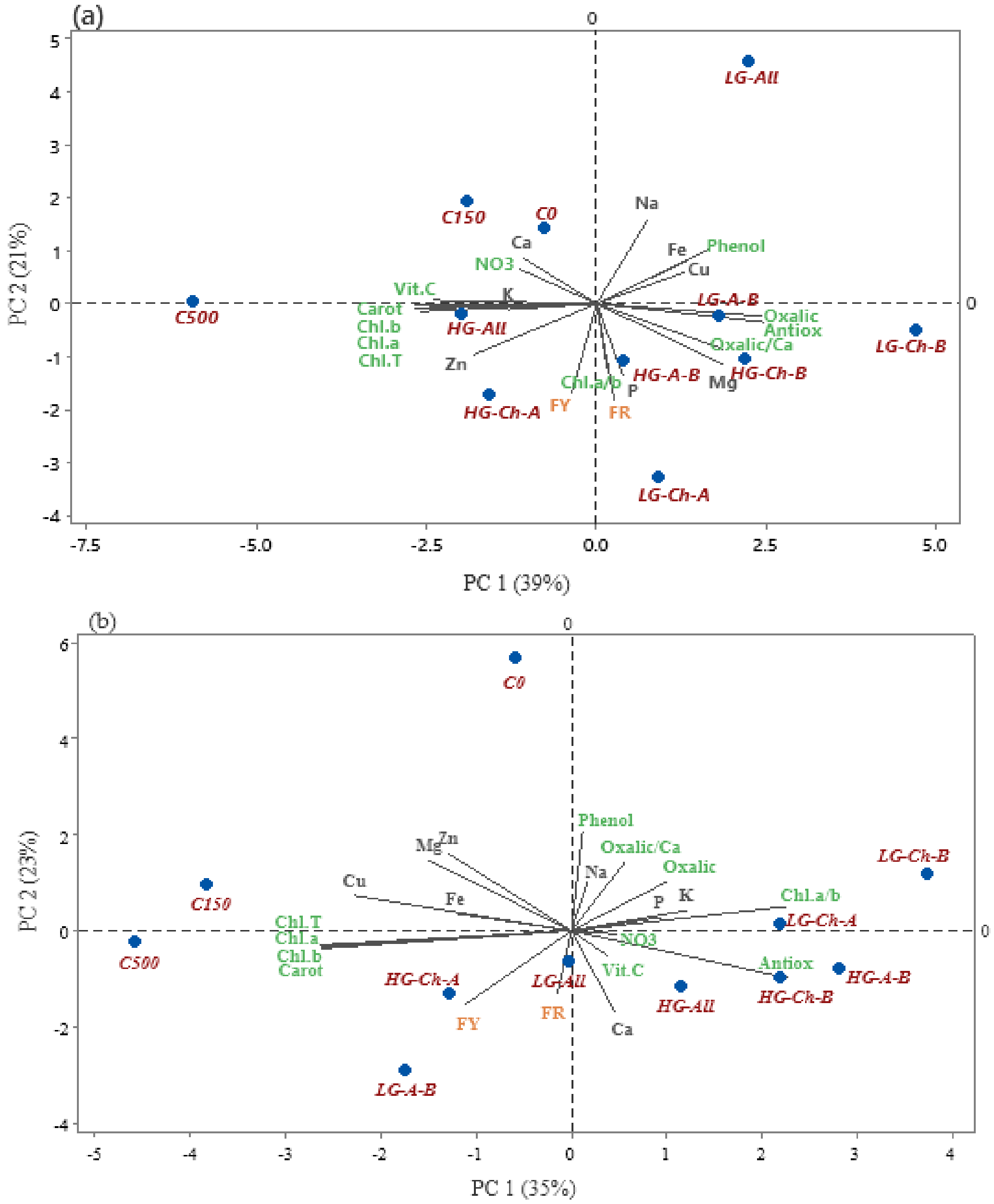
(Shukla & Mukhi, 1980) جذب بالای روی توسط ذرت را به‌دلیل افزایش نرخ پتاسیم گزارش کردند. در مورد برهمکنش مثبت مشاهده شده بین جذب فسفر و منیزیم، این امر ممکن است با نقش منیزیم در فعال‌سازی آنزیم‌های کیناز و واکنش‌های مربوط به انتقال فسفات توضیح داده شود (Fageria, 2001). در مقابل، فاجریا و بالیگار (Fageria & Baligar, 1999) هیچ اثر متقابلی بین جذب منیزیم و فسفر توسط لوبیا معمولی، برنج، ذرت، سویا و گندم مشاهده نکردند. کمپ (Kemp, 1983) گزارش داد با افزایش غلظت نیتروژن در محیط رشد، بسته به سطح پتاسیم محیط رشد، افزایش یا کاهش غلظت پتاسیم در گیاه را می‌توان انتظار داشت. برهمکنش‌های مثبت یا منفی می‌تواند بین نیتروژن و عناصر کم‌مصرف، به دنبال تغییرات pH ریزوسفر پس از استفاده از کودهای آمونیوم و نیترات رخ دهد (Fageria, 2001). بین عناصر غذایی گیاه برهمکنش‌های مثبت یا منفی وجود دارد، نیز ممکن است هیچ اثر متقابلی بین آنها وجود نداشته باشد. برهمکنش عناصر غذایی گیاه تحت تأثیر غلظت عناصر غذایی خاک، شدت نور، pH خاک، رطوبت خاک، هوادهی خاک، دما، سن و سرعت رشد گیاه، سرعت تعرق و تنفس گیاه، گونه‌های گیاهی، غلظت عناصر غذایی درون گیاهان و سیستم ریشه است (Fageria, 2001).

در کشت پاییز، یک برهمکنش منفی بین فسفر و جذب عناصر کم‌مصرف مشاهده شد (شکل ۱ b). محققان بیان کرده‌اند که جذب بالای فسفر منجر به افزایش نسبت P/Fe و P/Zn در گیاهان می‌شود (Loneragan *et al.*, 1982)، از این رو کمبود این عناصر کم‌مصرف رخ می‌دهد (Murphy *et al.*, 1981). با این وجود، به‌طور قطع مشخص نیست که برهمکنش عمده در گیاه رخ می‌دهد یا در خاک وجود دارد. در واقع با افزایش ورودی‌های فسفر، سرعت انتشار Zn خاک کاهش یافته و تثبیت آهن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، برهمکنش فسفر و آهن، به‌دلیل تشکیل فسفات آهن، منجر به کلروز آهن می‌شود (Ayed, 1970). کمبود آهن ناشی از افزایش ورودی‌های فسفر نیز به مکانیسم‌های دیگری مانند مهار جذب آهن توسط ریشه و انتقال آهن از ریشه به اندام‌های هوایی و غیرفعال‌سازی آهن گیاه نسبت داده شده است (Moraghan & Mascagnif, 2018). اثر متقابل منفی بین کلسیم و عناصر کم‌مصرف (در هر دو کشت)، کلسیم و منیزیم (در هر دو کشت) و کلسیم و فسفر (در کشت بهار) مشاهده شد. غلظت بالای کلسیم با کاهش نفوذپذیری سلول، جذب منیزیم را مهار می‌کند (Fageria, 1983). فاجریا و بالیگار (Fageria & Baligar, 1999) بیان کردند که با افزایش دو برابری غلظت کلسیم خاک، جذب منیزیم، روی، مس، منگنز، و آهن به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. با کاربرد آهن به مقدار ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، همراه یا بدون کاربرد کود نیتروژن، افزایش معنی‌داری در غلظت N، P، K، Zn، Cu و Mg، و کاهش معنی‌داری در غلظت Ca و Mn توسط علی و همکاران (Ali *et al.*, 1998) گزارش شد.

در هر دو کشت، وابستگی متقابل مشخصی بین شناسه‌های فیزیولوژیکی و عناصر مغذی در اسفناج یافت شد. در کشت اول، رابطه متقابل بالایی بین oxalic/Ca و Mg (r= ۰/۸۵)؛ فنل و Cu (r= ۰/۵۱)؛ فنل و Fe (r= ۰/۵۴) مشاهده شد. وابستگی ضعیف‌تری بین محتوای کلروفیل‌ها و کاروتنوئید با پتاسیم (r= ۰/۳۶-۰/۳۸)؛ فعالیت آنتی‌اکسیدانی با Mg (r= ۰/۳۶)، Fe (r= ۰/۴۲) و Cu (r= ۰/۴۱)؛ اگزالیک اسید با Mg، Fe و Cu تشخیص داده شد. در کشت دوم، وابستگی متقابل بالایی بین مقدار K و اگزالیک اسید وجود داشت. همچنین، وابستگی ضعیف‌تری بین Oxalic/Ca و Na؛ اگزالیک اسید و P تشخیص داده شد. وابستگی متقابل بین مقدار K و اگزالیک اسید، و مقدار Na و Oxalic/Ca می‌تواند به نقش اگزالات‌ها، به‌عنوان یک جزء فعال متابولیک، در جذب یون‌های معدنی توسط گیاهان مرتبط باشد (Rashid *et al.*, 2022). اگزالات‌ها معمولاً همراه با Na، Ca و Kبه شکل نمک‌های محلول و نامحلول یافت می‌شوند (Ferreira *et al.*, 2018). تعادل یونی سدیم و پتاسیم، تنظیم کلسیم و سم‌زدایی فلزات سنگین از جمله نقش‌های اگزالات در گیاهان هستند (Nakata, 2003).

در هر دو کشت، کلروفیل (نوع a و b) و محتوای کاروتنوئید به شدت به یکدیگر وابسته بودند. همچنین رابطه متقابل بین اگزالیک اسید و نسبت oxalic/Ca وجود داشت. علاوه بر این، فعالیت آنتی‌اکسیدانی وابستگی شدید به فنل (r= ۰/۷۴) (در کشت اول) و وابستگی ضعیف به ویتامین C (در کشت دوم) نشان داد (شکل ۱ a و ۱ b). اسفناج سرشار از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند اسیدهای فنولیک، ویتامینC ، فلاونوئیدها و رنگدانه‌ها (لوتئین، کاروتنوئیدها و کلروفیل) است (Bergman *et al.*, 2001). بنابراین، وابستگی متقابل بین فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل و ویتامین C را می‌توان انتظار داشت. بایلی و همکاران (Bayili *et al.*, 2011) بیان کردند که اسیدهای فنولیک، ویتامین C، فلاونوئیدها و رنگدانه‌ها (لوتئین، کاروتنوئیدها و ترکیبات کلروفیل) ممکن است مسئول فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا در اسفناج باشند.

گروه‌بندی کلیه تیمارها توسط تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که در کشت اول، تیمارهای شیمیایی و شاهد به وضوح از تیمارهای کمپوست (شکل ۱ a و ۱ b) به‌دلیل مقدار زیاد کلروفیل و کاروتنوئید، نیترات، K و Zn، و مقدار کم اگزالیک اسید، نسبت oxalic/Ca، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل، Na، Mg و P جدا شدند (جداول ۴ و ۵). نتایج مشابهی در کشت دوم مشاهده شد، با این تفاوت که Mg، Fe و P در تیمارهای شیمیایی و شاهد بیشتر بودند. همچنین در کشت دوم، تیمار شاهد از تیمارهای شیمیایی جدا شد.



شکل ۱- تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) داده‌های گیاه (عناصر غذایی، ویژگی‌های فیزیولوژیک، و وزن تازه بخش هوایی (FY) و وزن تازه ریشه (FR) برای کشت اول (a) و کشت دوم (b). برای علائم اختصاری تیمارها به جدول ٤ مراجعه کنید.

Figure 1- The principal component analysis (PCA) of the plant data (nutrients, physiologic parameters, and fresh shoot and root weight (FY and FR, respectively)) for the first (a) and the second (b) cultivations. For abbreviations of soil treatments see Table 4.

نتیجه‌گیری

نه تنها بین تیمارهای شیمیایی و تیمارهای کمپوست تفاوت در متغیرهای پاسخ مشاهده شد، بلکه بین تیمارهای مختلف کمپوست نیز تفاوت‌هایی دیده شد. تعداد برگ، عملکرد و وزن ریشه بالا در تیمارهای C500، LG-Ch-A در کشت بهار و تیمارهای LG-All و HG-All در کشت پاییز همراه با تجمع نیترات در اسفناج بود. در کشت پاییز، با افزایش سطح کود شیمیایی، سرعت رشد و عملکرد کاهش یافت، زیرا از یک طرف هر گیاه نیاز مشخصی به هر عنصر دارد و از طرف دیگر،

جذب عناصر دیگر تحت تأثیر افزایش سطح یک عنصر قرار می‌گیرد. در هر دو فصل کشت، رابطه‌ی هم‌افزایی بین عناصر فسفر، روی و منیزیم و رابطه‌ی هم‌آوردی بین کلسیم و منیزیم جذب شده توسط اسفناج وجود داشت. تیمارهای کمپوست اثرات متفاوتی بر رشد و ارزش غذایی اسفناج داشتند. در خاک‌های تیمار شده با کمپوست‌های غنی از P، K، Mg و Zn، اسفناج‌ها ارزش غذایی بالاتری داشتند. برهمکنش بین مواد مغذی و شناسه‌های فیزیولوژیکی مشاهده شد. به‌دلیل برهمکنش منفی بین کلسیم و جذب عناصر کم‌مصرف، و فسفر و جذب عناصر کم‌مصرف، کاهش جذب عناصر کم‌مصرف در غلظت بالای P و Ca رخ می‌دهد. کاهش جذب عناصر کم‌مصرف می‌تواند سبب افزایش تجمع نیترات شود؛ چرا که عناصر کم‌مصرف در ساختار آنزیم های کاهنده نیترات حضور دارند. وابستگی متقابل بین مقدار منیزیم و سدیم با نسبت oxalic/Ca، و پتاسیم با اگزالیک اسید می‌تواند به نقش اگزالات‌ها در جذب یون‌های معدنی مرتبط باشد، چرا که اگزالات‌ها معمولاً همراه با Na، Mg، Ca و K به شکل نمک‌های محلول و نامحلول یافت می‌شوند. این ترکیبات می‌توانند باعث ایجاد سنگ کلیه در مصرف‌کنندگان شوند. گروه‌بندی تیمارها توسط تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که تیمارهای شیمیایی و شاهد به وضوح از تیمارهای کمپوست، به‌دلیل مقدار زیاد کلروفیل و کاروتنوئید، نیترات، K و Zn و مقدار کم اگزالیک اسید، نسبت oxalic/Ca، فعالیت آنتی اکسیدانی، فنل و Na جدا شدند. به‌طور کلی، استفاده از تیمارهای C500، LG-Ch-A، LG-All و HG-All به‌دلیل تجمع نیترات در اسفناج توصیه نمی‌شود.

References

1. Ahmadi, F., & Jafarpour, M. (2015). The functional effect of different organic matter on spinach (*Spinacia oleracea*) . *Journal of Earth, Environment and Health Sciences*, *1*(1), 1. https://doi.org/10.4103/2423-7752.159915
2. Alessa, O., Najla, S., & Murshed, R. (2017). Improvement of yield and quality of two *Spinacia oleracea* L. varieties by using different fertilizing approaches. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *23*(3), 693–702. https://doi.org/10.1007/s12298-017-0453-8
3. Ali, Z.I., Malik, E.M.A., Babiker, H.M., Ramraj, V.M., Sultana, A., & Johansen, C. (1998). Iron and nitrogen interactions in groundnut nutrition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *29*(17–18), 2619–2630. https://doi.org/10.1080/00103629809370138
4. Anwar, Z., Irshad, M., Bilal, M., Irshad, U., Hafeez, F., & Owens, G. (2017). Changes in availability of plant nutrients during composting of cow manure with poplar leaf litter. *Compost Science and Utilization*, *25*(4), 242–250. https://doi.org/10.1080/1065657X.2017.1300547
5. Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, *24*(1), 1–15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1
6. Ayed, I.A. (1970). A study of the mobilization of iron in tomato roots by chelate treatments. *Plant and Soil*, *32*(1), 18–26. https://doi.org/10.1007/BF01372842
7. Bayili, R.G., Abdoul-Latif, F., Kone, O.H., Diao, M., Imael, H., Bassole, N., & Dicko, M.H. (2011). Phenolic compounds and antioxidant activities in some fruits and vegetables from Burkina Faso. *African Journal of Biotechnology*, *10*(62), 13543–13547. https://doi.org/10.5897/ajb10.2010
8. Bergman, M., Varshavsky, L., Gottlieb, H.E., & Grossman, S. (2001). The antioxidant activity of aqueous spinach extract: Chemical identification of active fractions. *Phytochemistry*, *58*(1), 143–152. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00137-6
9. Boldrin, A., Andersen, J.K., Møller, J., Christensen, T.H., & Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, *27*(8), 800–812. https://doi.org/10.1177/0734242X09345275
10. Cataldo, D.A., Haroon, M. H., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *6*(1), 71–80. https://doi.org/10.1080/00103627509366547
11. Cheng, K.L., & Bray, R.H. (1951). Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. *Soil Science*, *72*(6), 449–458. https://doi.org/10.1097/00010694-195112000-00005
12. Citak, S., & Sonmez, S. (2010). Effects of conventional and organic fertilization on spinach (*Spinacea oleracea* L.) growth, yield, vitamin C and nitrate concentration during two successive seasons. *Scientia Horticulturae*, *126*(4), 415–420. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.08.010
13. Deveci, M., & Uzun, E. (2011). Determination of phenolic compounds and chlorophyll content of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) at different growth stages. *Asian Journal of Chemistry*, *23*(8), 3739–3743.
14. Elia, A., Santamaria, P., & Serio, F. (1998). Nitrogen nutrition, yield and quality of spinach. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *76*(3), 341–346. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199803)76:3<341::AID-JSFA938>3.0.CO;2-4
15. Erfani, F., Hassandokht, M.R., Barzegar, M., & Jabbari, A. (2006). Determination and comparison of chemical properties of seven Iranian spinach cultivars. *Journal of Food Science and Technology(Iran)*, *3*(2), 27–33.

16. Estefan, G., Sommer, R., & Ryan, J. (2013). *Methods of Soil, Plant , and Water Analysis : A manual for the West Asia and North* (Third Edit). International Center for Agricultural Research in the Dry Sreas.
17. Fageria, N.K., & Baligar, V.C. (1999). Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean, and wheat at different soil pH on an inceptisol. *Journal of Plant Nutrition*, *22*(9), 1495–1507. https://doi.org/10.1080/01904169909365730
18. Fageria, N Kumar. (1983). Ionic interactions in rice plants from dilute solutions. *Plant and Soil*, *70*(3), 309–316. https://doi.org/10.1007/BF02374887
19. Fageria, V.D. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, *24*(8), 1269–1290. https://doi.org/10.1081/PLN-100106981
20. Ferreira, J.F., Sandhu, D., Liu, X., & Halvorson, J.J. (2018). Spinach (*Spinacia oleracea* L.) response to salinity: nutritional value, physiological parameters, antioxidant capacity, and gene expression. *Agriculture*, *8*, 163.
21. Ghaly, F., Baddour, G., & El-Azazy, H. (2017). Nitrate accumulation and oxalate formation in spinach plants (*Spinacia oleracea* L.) as affected by nitrogen fertilization levels and iron foliar application. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, *8*(11), 571–576. https://doi.org/10.21608/jssae.2017.38092
22. Graham, R.F., Wortman, S.E., & Pittelkow, C.M. (2017). Comparison of organic and integrated nutrient management strategies for reducing soil N_2O emissions. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(4). https://doi.org/10.3390/su9040510
23. Gupta, K., & Wagle, D.S. (1988). Nutritional and antinutritional factors of green leafy vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *36*(3), 472–474. https://doi.org/10.1021/jf00081a016
24. Hargreaves, J.C., Adl, M.S., & Warman, P.R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *123*(1–3), 1–14. https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004
25. Hodges, D.M., & Forney, C.F. (2003). Postharvest ascorbate metabolism in two cultivars of spinach differing in their senescence rates. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *128*(6), 930–935. https://doi.org/10.21273/jashs.128.6.0930
26. Huang, C.Y.L., & Schulte, E.E. (1985). Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *16*(9), 943–958. https://doi.org/10.1080/00103628509367657
27. Kemp, A. (1983). The Effect of fertilizer treatment of grassland on the biological availability of magnesium. In role of magnesium in animal nutrtition (pp. 143–157).
28. Khan, M.A.I., Ueno, K., Horimoto, S., Komai, F., Tanaka, K., & Ono, Y. (2007). Evaluation of the physio-chemical and microbial properties of green tea waste-rice bran compost and the effect of the compost on spinach production. *Plant Production Science*, *10*(4), 391–399. https://doi.org/10.1626/pps.10.391
29. Kunicki, E., Grabowska, A., Sękara, A., & Wojciechowska, R. (2010). The effect of cultivar type, time of cultivation, and biostimulant treatment on the yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.) . *Folia Horticulturae*, *22*(2), 9–13. https://doi.org/10.2478/fhort-2013-0153
30. Li, W., Pickard, M.D., & Beta, T. (2007). Effect of thermal processing on antioxidant properties of purple wheat bran. *Food Chemistry*, *104*(3), 1080–1086. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.024
31. Lichtenthaler, H.K., & Wellburn, A.R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, *11*(5), 591–592. https://doi.org/10.1042/bst0110591
32. Lomnitski, L., Bergman, M., Nyska, A., Ben-Shaul, V., & Grossman, S. (2003). Composition, efficacy, and safety of spinach extracts. *Nutrition and Cancer*, *46*(2), 222–231. https://doi.org/10.1207/S15327914NC4602_16
33. Loneragan, J.F., Grunes, D.L., Welch, R.M., Aduayi, E.A., Tengah, A., Lazar, V.A., & Cary, E.E. (1982). Phosphorus accumulation and toxicity in leaves in relation to zinc supply. *Soil Science Society of America Journal*, *46*(2), 345–352. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600020027x
34. Machado, R.M.A., Alves-Pereira, I., Lourenço, D., & Ferreira, R.M.A. (2020). Effect of organic compost and inorganic nitrogen fertigation on spinach growth, phytochemical accumulation and antioxidant activity. *Heliyon*, *6*(9). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05085
35. Machado, Rui M.A., Alves-Pereira, I., Robalo, M., & Ferreira, R. (2021). Effects of municipal solid waste compost supplemented with inorganic nitrogen on physicochemical soil characteristics, plant growth, nitrate content, and antioxidant activity in Spinach. *Horticulturae*, *7*(3), 53. https://doi.org/10.3390/horticulturae7030053
36. Maynard, D.N., Barker, A.V., Minotti, P.L., & Peck, N.H. (1976). Nitrate accumulation in vegetables. *Advances in Agronomy*, *28*(C), 71–118. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60553-2
37. Mengel, K., & Kirkby, E. (2001). *Principles of plant nutrition.* In International Potash Institute, Bern, Switzerland (5th Ed, Vol. 129, Issue 1). https://doi.org/10.1097/00010694-198001000-00011
38. Minitab Inc. (2013). *MINITAB statistical software*. In Version: Release 16 (No. 18; Vol. 14, Issue c, p. 10). Pennsylvania State University.
39. Moraghan, J.T., & Mascagni, H.J. (2018). Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. In Micronutrients in Agriculture (pp. 371–425). https://doi.org/10.2136/sssabookser4.2ed.c11
40. Murphy, L.S., Ellis, R., & Adriano, D.C. (1981). Phosphorus-micronutrient interaction effects on crop production.

Journal of Plant Nutrition, *3*(1–4), 593–613. https://doi.org/10.1080/01904168109362863
41. Naik, V.V, Mahavidyalaya, S.P.K., & Sindhudurg, D. (2014). Methodology in determination of oxalic acid in plant tissue: a comparative approach. *Journal of Global Trends in Pharmaceutical Sciences*, *5*(2), 1662–1672.
42. Nakata, P.A. (2003). Advances in our understanding of calcium oxalate crystal formation and function in plants. *Plant Science*, *164*(6), 901–909. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00120-1
43. Rasband, W. (2018). *ImageJ* (2.0.0-rc-69/1.52p; java 1.8.0_172 [64-bit]). Bethesda, Maryland: U. S. National Institutes of Health.
44. Rashid, M., Yousaf, Z., Din, A., Munawar, M., Aftab, A., Riaz, N., Younas, A., Alaraidh, I.A., Okla, M.K., & AbdElgawad, H. (2022). Assessment of mineral nutrient efficiency in genetically diverse spinach accessions by biochemical and functional marker strategies. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.889604
45. Sadasivam, S., & Balasubramanian, T. (1987). *Practical Manual in Biochemistry*.
46. Salarinik, Kh., & Nael, M. (2024). The impact of agricultural waste and residue composts on two consecutive spinach cultivations: 1- response of soil fertility indicators, plant nutrient uptake, and yield. *Journal of Water and Soil*, *37*(6), 871-890. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83762.1318
47. SAS Institute Inc. (2013). *SAS/ACCESS® 9.4 Interface to ADABAS: Reference.* (9.4). Cary, NC: SAS Institute Inc.
48. Shukla, U.C., & Mukhi, A.K. (1980). Ameliorative role of Zn, K, and gypsum on maize growth under alkali soil conditions. *Agronomy Journal*, *72*(1), 85–88. https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200010017x
49. Singleton, V.L., & Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, *16*(3), 144–158.
50. Stagnari, F., Di Bitetto, V., & Pisante, M. (2007). Effects of N fertilizers and rates on yield, safety and nutrients in processing spinach genotypes. *Scientia Horticulturae*, *114*(4), 225–233. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.06.016
51. Tanaka, F., Kim, T.H., & Yoneyama, T. (2001). Relationship between oxalate synthesis and nitrate reduction in spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants tracing by 13C and 15N. *Plant Nutrition*, 302–303. https://doi.org/10.1007/0-306-47624-x_145
52. Wang, F., Wang, G., Li, X., Huang, J., & Zheng, J. (2008). Heredity, physiology and mapping of a chlorophyll content gene of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Physiology*, *165*(3), 324–330. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.11.006
53. Wang, N., Fu, F., Wang, H., Wang, P., He, S., Shao, H., Ni, Z., & Zhang, X. (2021). Effects of irrigation and nitrogen on chlorophyll content, dry matter and nitrogen accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Scientific Reports*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-95792-z
54. Xu, C., & Mou, B. (2016). Responses of spinach to salinity and nutrient deficiency in growth, physiology, and nutritional value. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *141*(1), 12–21. https://doi.org/10.21273/jashs.141.1.12
55. Yang, S., Zhang, Z., Cong, L., Wang, X., & Shi, S. (2013). Effect of fulvic acid on the phosphorus availability in acid soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *13*(3), 526–533. https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000041
56. Yosefi, Z., Tabaraki, R., Gharneh, H.A.A., & Mehrabi, A.A. (2010). Variation in antioxidant activity, total phenolics, and nitrate in spinach. *International Journal of Vegetable Science*, *16*(3), 233–242. https://doi.org/10.1080/19315260903577278